

О. К. Колесницький, к. т. н., доц.; І. В. Бокоцей; А. А. Корінний

АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЙРОНА

У статті наведено класифікацію та порівняльний аналіз принципів побудови та властивостей відомих пристроїв для моделювання нейрона, виявлено їхні недоліки та запропоновано шляхи їх усунення.

Ключові слова: *нейрон, модель нейрона, нейронна мережа, апаратна реалізація, імпульсна нейронна мережа, оптоелектронна елементна база.*

Вступ

На сучасному етапі розвитку техніки та технологій людський мозок набагато краще за комп'ютерні системи виконує такі складні завдання, як: аналіз та розпізнавання великих обсягів інформації, що надходить від органів сприйняття; завдання пошуку оптимальних рішень за умови багатопараметричних вхідних даних; завдання планування та прогнозування за відсутності повної початкової інформації. Комп'ютер, навпаки, найефективніше використовується для розв'язання задач, пов'язаних з точними обчисленнями за формулами, законами, арифметичними операціями і т. ін. Для того, щоб поєднати потужності мозку та комп'ютера, необхідно створити апаратні реалізації багатofункційних штучних нейронних мереж з великою кількістю нейронів.

Постановка завдання. Як відомо [1], для отримання максимуму переваг від застосування нейронних мереж для практичних завдань розпізнавання образів різного походження потрібні апаратні реалізації (а не програмні чи програмно-апаратні) нейронних мереж з якомога більшою кількістю нейронних елементів. В ідеалі ця кількість повинна наближатися до кількості нейронів у мозку людини – $(2...5) \times 10^{11}$. Тому актуальним є завдання ефективної апаратної реалізації моделей нейронів та нейронних мереж в цілому.

Мета цієї статті – провести класифікацію та порівняльний аналіз відомих пристроїв для моделювання нейрона, їхніх властивостей, проаналізувати недоліки відомих пристроїв для моделювання нейрона та запропонувати шляхи усунення цих недоліків.

1. Актуальність дослідження і розробки пристроїв для моделювання нейрона

Результати вивчення нейронних мереж знаходять застосування під час створення пристроїв для розпізнавання зорових і звукових образів, для діагностики стану технічних об'єктів, розробки методів адаптивного управління, конструювання надійних і гнучких обчислювальних машин, навчання роботів складній поведінці та в багатьох інших випадках. Актуальність цього наукового напрямку підтверджується прийняттям державних наукових програм з дослідження нейроподібних систем обробки інформації. Наприклад, в ЄС – це програма Blue Brain Project — проект з комп'ютерного моделювання неокортексу людини. Над проектом спільно працюють компанія IBM та Швейцарський федеральний технічний інститут Лозанни (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne – EPFL). А в Україні – це державна наукова програма «Образний комп'ютер» [2]. Образний комп'ютер [2], так само і як один з його складників «око-процесор» [3], передбачає створення інтелектуальних систем, які моделюють сприйняття і мислення людини, серед них і на базі штучних нейронних мереж.

Розуміння механізмів обробки інформації в мозку людини і практична реалізація цих принципів на сучасній елементній базі – актуальне наукове завдання. Для його розв'язання

потрібно дослідити, як і які надструктури нейронів можуть моделювати елементарні акти розумової діяльності. А для цього потрібно мати максимально адекватні до біологічних нейронів фізичні та комп'ютерні моделі нейронних елементів та мереж.

Під час побудови нейроподібних систем штучного інтелекту можна виділити два основних підходи: так звані підходи „зверху” та „знизу”. Перший підхід – підхід „зверху” – передбачає створення таких функціональних або інформаційних структур, які моделюють процеси, що відбуваються в мозку людини під час сприйняття інформації. Внутрішня структура самого мозку при цьому не враховується. Тому нейронні елементи, які використовують підхід „зверху”, використовуються для вивчення принципів функціонування мозку, а тому їх структура може бути більш складною для виконання великої кількості операцій. Другий підхід передбачає створення так званих імітаційних структур, тобто таких систем, структура яких подібна структурі мозку людини. Нейронні елементи для такого підходу повинні бути найпростішими, але водночас – досить точними, оскільки вони будуть використовувати для побудови нейронних мереж.

2. Класифікація пристроїв для моделювання нейрона

На сьогодні існує багато різноманітних підходів до побудови пристроїв для моделювання нейронів (ПМН), тому постає завдання їхнього аналізу та класифікації [3, 4].

ПМН можна класифікувати за такими ознаками:

- форма представлення інформації (цифрова або аналогова);
- тип елементної бази;
- характер настроювання синапсів (постійні або змінні);
- час передачі сигналів (синхронні або асинхронні).

Класифікація ПМН за формою представлення інформації показана на рис. 1.

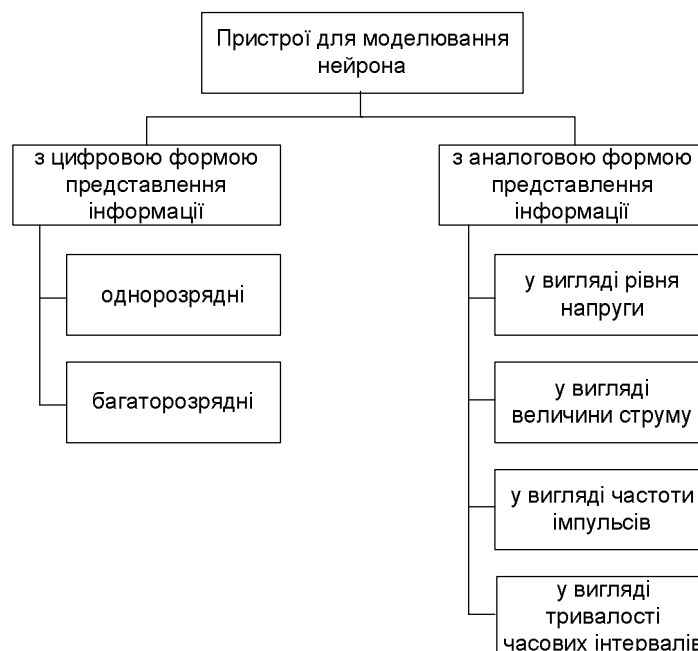


Рис. 1. Класифікація пристроїв для моделювання нейрона за формою представлення інформації

За формою представлення інформації всі ПМН можуть бути розділені на два основних класи – див. рис. 1:

– ПМН, у яких вхідні, вихідні сигнали та вагові коефіцієнти зв'язку представляються у вигляді цифрових кодів (вони зазвичай будуються на цифрових елементах – інверторах, логічних елементах, тригерах, регістрах, цифрових суматорах, цифрових компараторах,

запам'ятовуючих пристроях та ін.). Цифрові ПМН бувають однорозрядні (наприклад, формальний нейрон) та багаторозрядні;

– ПМН, у яких вхідні, вихідні сигнали та вагові коефіцієнти зв'язку представляються у вигляді аналогових сигналів (вони зазвичай будуються на аналогових елементах – операційних підсилювачах і компараторах або на електронних компонентах: діодах, транзисторах, тиристорах, резисторах, конденсаторах та ін.). Залежно від виду аналогового сигналу розрізняють ПМН з представленням інформації у вигляді: 1) рівня напруги, 2) величини струму, 3) частоти імпульсів, 4) тривалості часових інтервалів.

Класифікація нейронних елементів за типом елементної бази представлена на рис. 2. Серед електронної елементної бази можна виділити три основні групи: надвеликі інтегральні схеми (НВІС), інтегральні схеми середнього ступеня інтеграції (СІС) та програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС). НВІС містять до 1 мільйона елементів у кристалі, тоді як СІС лише до 1000 елементів. Основним елементом аналогових мікросхем є біполярні та польові транзистори.

ПЛІС (*programmable logic device, PLD*) – електронний компонент, який використовують для створення цифрових інтегральних схем. На відміну від звичайних цифрових мікросхем, логіка роботи ПЛІС задається за допомогою програмування, а не під час виготовлення. Основні типи ПЛІС:

- FPGA (*field-programmable gate array*);
- CPLD (*complex programmable logic device*);
- PAL (*programmable array logic*);
- GAL (*gate array logic*).

Типи PAL і GAL мають простішу архітектуру. Альтернативою ПЛІС є:

- БМК (*Uncommitted Logic Array*) – базові матричні кристали, що потребують виробничого процесу на заводі для програмування. Вони є великими інтегральними схемами, які програмують технологічно шляхом нанесення маски з'єднань останнього шару металізації;
- ASIC (*application-specific integrated circuit*) – спеціалізовані замовні для розв'язання конкретного завдання інтегральні схеми;
- спеціалізовані процесори або мікроконтролери (повільніші за ПЛІС).

Серед оптоелектронної елементної бази можна виділити чотири основні групи: оптоелектронні мікросхеми на основі фотодіодів та операційних підсилювачів (ФД-ОП), пристрої на основі оптично керованих транспарантів (ОКТ), пристрої на основі оптичних бістабільних SEED-приладів (*Self-Electrooptic Effect Device*) та пристрої на основі просторово-часових модуляторів світла (ПМС).

Класифікація ПМН за характером налагоджування синапсів:

- з фіксованими ваговими коефіцієнтами (обирають одразу, виходячи з умов задачі);
- з ваговими коефіцієнтами, які налагоджують (у процесі навчання відбувається налагоджування ваги синаптичних зв'язків).

У ряді нейронних елементів функція активації може залежати від часу передачі імпульсу (сигналу) по каналах зв'язку τ_{ij} , тому за часом передачі сигналів моделі нейронних елементів можна поділити на синхронні та асинхронні. *Синхронним нейроном* називають такий нейрон, у якого час передачі τ_{ij} кожного зв'язку дорівнює або нулю, або фіксованій сталій τ . *Асинхронним* називають такий нейрон, у якого час передачі τ_{ij} для кожного зв'язку між елементами постійний та свій.

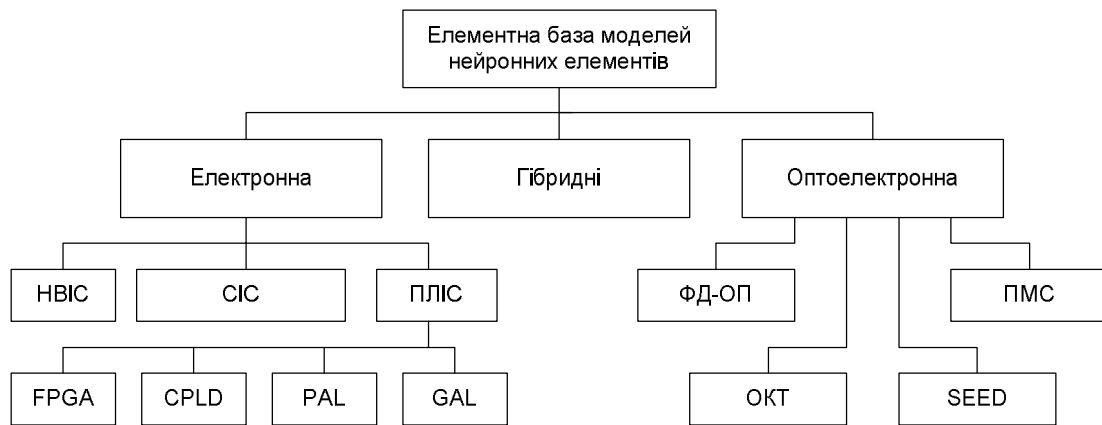


Рис. 2. Класифікація ПМН за типом елементної бази

3. Відомі пристрої для моделювання нейрона та їхні недоліки

У патентних джерелах колишнього СРСР (СНГ), України та РФ знайдено 114 різноманітних ПМН. Нижче розглянемо детально ПМН окремих типів, відображених на рис. 1.

З проведеного огляду літератури видно, що на теренах колишнього СРСР дослідженнями в галузі ПМН займалися такі інститути, як: Уфімський авіаційний інститут, Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова АН України, Ростовський державний університет, Таганрозький радіотехнічний інститут, Львівський державний медичний інститут, Інститут фізіології ім. І. П. Павлова, Львівський політехнічний інститут, Вінницький національний технічний університет, Казанський державний університет, Одеський державний університет, Дніпропетровський державний університет, московські ВНЗ (МДУ ім. М. В. Ломоносова, МІФІ, МІРЕА, МВТУ ім. М. Е. Баумана) та інші.

Одним із представників цифрових однорозрядних ПМН є модель формального нейрона [5], який містить логічні елементи І-НІ й інвертори з вхідними діодами Шоттки та транзисторами. В основі моделі – звичайний R-S-тригер. Цифрові логічні схеми часто використовують для побудови формального нейрона, але також іноді використовують екзотичні елементи, наприклад, іонотронний транзистор (а. с. СРСР № 619933) або пристрої з циліндричними магнітними доменами – ЦМД (а. с. СРСР № 1013984). Формальні моделі нейрона є дуже спрощеними, оскільки вхідні та вихідні сигнали в них бінарні (хоча ваги розрядів можуть бути багатозначними). Саме тому вони є малофункціональними й на сучасному етапі дуже рідко використовуються для побудови нейронних мереж. Зараз перспективнішими є моделі нейронів з багатозначними (нескінченнозначними) вхідними, вихідними сигналами та вагами синапсів [4].

Цифрові багаторозрядні ПМН – більш численний клас. Їхнім типовим представником є пристрій [6] для моделювання нейрона (рис. 3), який містить дві групи інформаційних входів $1_1 \dots 1_n$ і $2_1 \dots 2_n$, n блоків $3_1 \dots 3_n$ зміни синаптичних ваг, установчі входи $4_1 \dots 4_n$, суматор 5, елементи І 6 і 7, реєстри 8 і 9, логічний блок 10, керуючі входи 11 – 16, інформаційні виходи 17 – 20. У блоках $3_1 \dots 3_n$ зміни синаптичних ваг відбувається множення вхідних сигналів $x_{i,1}, \dots, x_{i,n-1}$ на поточні значення синаптичних ваг $\gamma_{i,1}, \dots, \gamma_{i,n-1}$ і в режимах градуального та формального нейронів, множення величини порогу $(-\theta)$ на 1, отримані добутки підсумовують у суматорі 5 (для перших двох режимів $P_i = \sum_{j=1}^{n-1} x_{ij} \cdot \gamma_{ij} - \theta$). На виході 20 формується вихідний сигнал $Y_{вих}$, який буде для режиму градуального $Y_{вих} = \max\{0; P_i\}$ і

формального $Y_{вих} = \text{sign}\left(\sum_{j=1}^{n-1} x_{ij} \cdot \gamma_{ij} - \theta\right)$ нейрона. Недоліком цього пристрою є недостатня

швидкодія через послідовний принцип оброблення n операндів у суматорі. Головною перевагою багаторозрядних цифрових ПМН є висока (цифрова) точність моделювання, а головним недоліком – великі апаратні витрати.

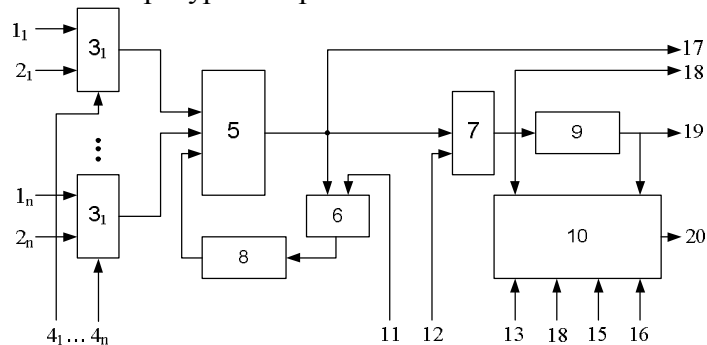


Рис. 3. Багаторозрядний цифровий пристрій для моделювання нейрона

Типовим представником аналогових ПМН, у яких інформацію представлено у вигляді рівня напруги, є пристрій для відтворення передатної функції нервової клітини (рис. 4) [7], який складається з суматора 1, інтеграторів 2 і 3, інвертора 4, блока множення 5, реле 6 з контактною групою 7, входів 8 і 9 та виходу. Як бачимо, основою таких ПМН є операційні підсилювачі, тому вони мають меншу точність моделювання, ніж багаторозрядні цифрові ПМН, але апаратно простіші за них. Незважаючи на це, апаратні витрати таких ПМН ще не дозволяють будувати на їхній основі великомасштабні нейронні мережі.

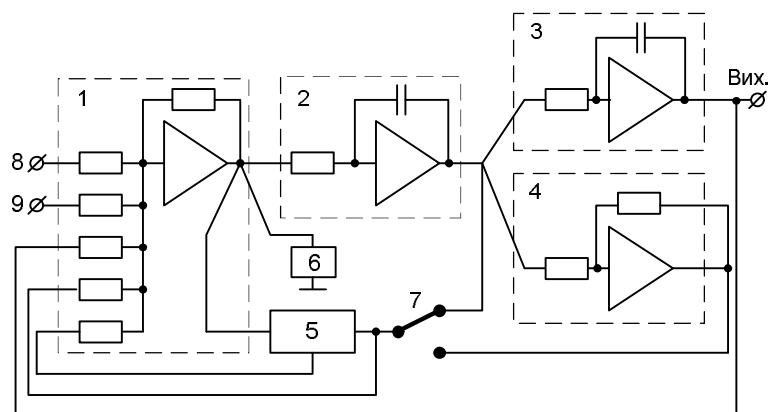
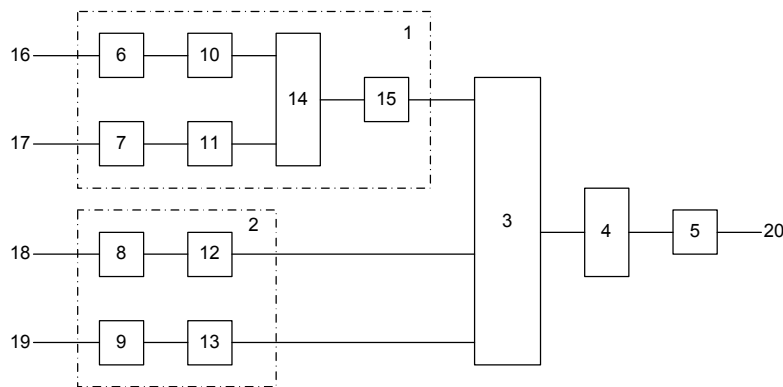


Рис. 4. Пристрій для відтворення передатної функції нервової клітини

Одним із представників аналогових ПМН, у яких інформацію представлено у вигляді величини струму, є пристрій для моделювання нейрона [8], який побудований на I^2L -вентиліях і містить двоколекторні інвертори-мультиплікатори струму, чотиризначні I^2L -вентилі та порогові детектори. Функціональну схему пристрою зображено на рис. 5. Вона містить групу каналів збудження 1 та гальмування 2, суматор 3, пороговий блок 4 і блок 5 формування вихідного сигналу. Кожна група каналів 1 і 2 містить блоки 6 – 9 зважування вхідних сигналів і вхідні порогові блоки 10 – 13 відповідно. Група каналів збудження 1 додатково містить суматор 14 зважених вхідних сигналів та інвертор 15.

Найчисленнішими є ПМН із частотно-імпульсною формою представлення інформації. Це можна пояснити тим, що в біологічних нейронах інформація також представлена імпульсами, частота яких залежить від рівня збудження. За апаратною складністю такі ПМН можна поділити на три класи:

Рис. 5. Пристрій для моделювання нейрона на I²L-вентиліях

1) найскладніші – із використанням цифрової елементної бази (лічильники, тригери, перетворювачі частота – напруга та напруга – код). Приклад – патент України № 46470,

2) середньої складності – із використанням аналогової елементної бази (операційні підсилювачі, аналогові компаратори, перетворювачі частота – напруга та напруга – частота). Приклад – а. с. СРСР № 886016.

3) найпростіші – із використанням нелінійних електронних (оптоелектронних) елементів (одноперехідний транзистор [9], лавинний транзистор [10], тиристор [11], біспін-прилад [12], тригер Шмідта на МДН-транзисторах [13]).

Звичайно, з погляду апаратної реалізації нейромереж із великою кількістю елементів найбільш привабливими є найпростіші ПМН.

Як приклад розглянемо ПМН [9], який містить (рис. 6) одноперехідний транзистор 1, біполярний транзистор 2, резистори 3 – 6, резистор навантаження 7, конденсатори 8 – 10, діоди 11-12. Активним елементом є одноперехідний транзистор 1, резистори 3, 5 і 7 забезпечують заданий режим роботи, збуджувальний 13 і гальмівний 14 входи містять діоди 11, 12 і ланцюги часового підсумовування, які складаються з резисторів 6, 4 і конденсаторів 9, 10. Недоліками пристроїв [9 – 13] є наявність електричних входів та виходів (що не дозволяє організувати велику кількість зв'язків нейронів) та низька навантажувальна спроможність (неможливість керувати великими струмами, необхідними для живлення матриць світлодіодів або напівпровідникових лазерів під час організації оптичних виходів нейрона).

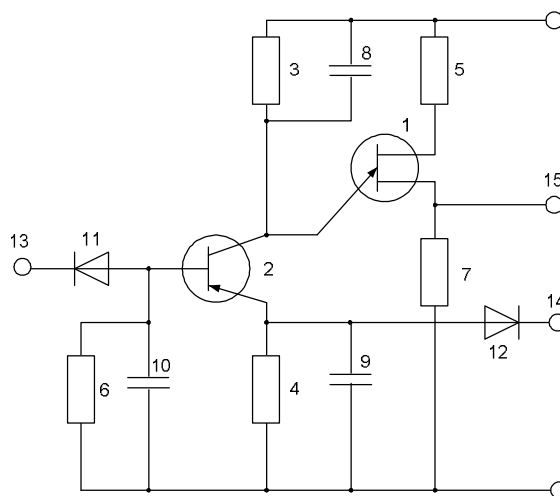


Рис. 6. Пристрій для моделювання нейрона на одноперехідному транзисторі

ПМН, у яких інформацію представлено у вигляді тривалості часових інтервалів, під час проведеного огляду знайдено не було. Проте авторами в роботі [14] запропоновано модель

нейрона логіко-часового типу, який працює саме з тривалостями часових інтервалів.

4. Рекомендації щодо апаратної реалізації нейронних мереж та шляхи вдосконалення пристроїв для моделювання нейрона

З проведеного в попередній главі статті огляду типових ПМН видно, що:

1) цифрові однорозрядні ПМН дуже спрощено відтворюють роботу біологічного нейрона, тому доречні тільки на початковому етапі дослідження штучних нейронних структур;

2) побудова цифрових багаторозрядних ПМН потребує значних апаратних витрат, але ці ПМН є досить точними і багатофункціональними, а тому придатні для використання під час детального вивчення та дослідження роботи окремих біологічних нейронів або невеликих ансамблів нейронів. Огляд показав, що їхні недоліки - низька швидкодія і значна апаратна складність. Тому необхідно збільшувати швидкодю таких пристроїв, що і пропонують автори в роботах [15 – 17];

3) ПМН, які працюють з аналоговою інформацією, що представлена напругою, струмом або частотою, зазвичай значно простіші за багаторозрядні цифрові ПМН, але мають обмежені функціональні можливості та невисоку точність моделювання. Тому, крім використання для дослідження функціонування біологічних нейронів, їх можна застосовувати для побудови апаратних реалізацій нейронних мереж з великою кількістю елементів.

Безсумнівним є той факт, що для отримання максимуму переваг від застосування нейронних мереж для практичних завдань розпізнавання образів різного походження, потрібні апаратні реалізації нейронних мереж з якомога більшою кількістю нейронних елементів. В ідеалі ця кількість повинна наближатись до кількості нейронів у мозку людини – $(2...5) \times 10^{11}$. Тому такі нейронні елементи повинні бути якомога простішими і придатними для виконання в інтегральному вигляді.

Відома, наприклад, структура імпульсної нейронної мережі [18] на основі оптоелектронної елементної бази просторово-неперервних оптоелектронних структур (ПНОЕС) показана на рис. 7. Вона складається з n вхідних нейронних елементів $EI_1...EI_n$, на які надходять вхідні сигнали $x_1 ... x_n$, N інтернейронів $E_I...E_N$, двох циліндрових лінз ЦЛ 1 і ЦЛ2, транспаранта Т (виготовленого, наприклад, у вигляді фотопластини, коефіцієнти прозорості локальних ділянок якої відповідають значенням вагових коефіцієнтів зв'язку інтернейронів), оптично керованого транспаранта ОКТ із системою з $2m$ пар смугових вертикальних електродів, m вихідних нейронних елементів $EO_1 ... EO_n$, волоконно-оптичного жгута ВОЖ із фоконами Ф1 і Ф2. В ОКТ непарні пари електродів відповідають збуджувальним (*Excitatory*) зв'язкам і мають виводи Y_i^E і $Y_i^{E'}$, а парні пари електродів відповідають гальмівним (*Inhibitory*) зв'язкам і мають виводи Y_i^I і $Y_i^{I'}$ ($i=1...m$). Транспарант Т і ОКТ утворюють загальну матрицю вагів зв'язків усіх нейронів ІНМ.

Головним недоліком цієї апаратної реалізації є погані конструктивно-технологічні параметри, а саме:

– через наявність таких оптичних елементів, як: циліндричні лінзи, фокони та волоконно-оптичний жгут – маса пристрою буде великою;

– через необхідність певної відстані (визначається фокусною відстанню циліндричних лінз) від масиву вхідних та інтер-нейронів до матриці зв'язків та від матриці зв'язків до вихідних нейронів пристрій матиме значну довжину, а значить, і об'єм;

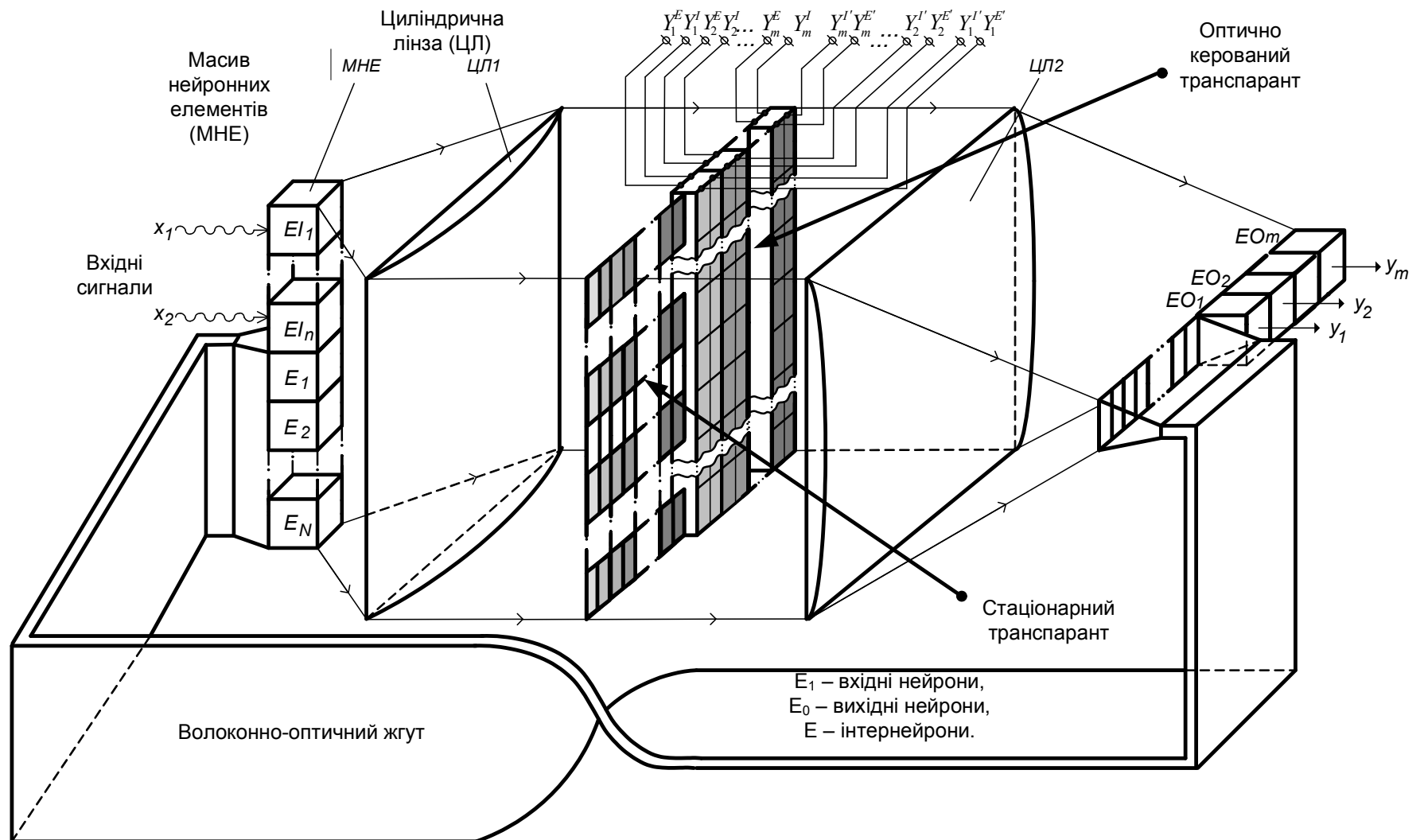


Рис. 7. Структура імпульсної нейронної мережі на основі оптоелектронної елементної бази ПНОЕС

– через те, що вихідний оптичний сигнал одного нейрона розширюється циліндричною лінзою на весь рядок матриці зв'язків, він повинен мати значну потужність. Це потребує використання в якості світловипромінювачів потужних напівпровідникових лазерів, що у свою чергу викликає необхідність потужних вихідних каскадів нейронних елементів, здатних видавати великі струми. А за великої кількості нейронів у мережі оптична потужність на один елемент матриці зв'язків усеодно може виявитися недостатньою.

Отже, шляхи покращення багаторозрядних цифрових ПМН полягають у підвищенні швидкодії, а аналогових ПМН – у підвищенні навантажувальної спроможності (вихідної оптичної потужності) та створенні таких ПМН, які дозволяли б будувати на їхній основі нейронні мережі з поліпшеними масо-габаритними показниками. Результати проведеного аналізу наведено у вигляді логічної структури на рис. 8.

Для підвищення швидкодії та розширення функціональних можливостей багаторозрядних цифрових ПМН авторами створено декілька варіантів ПМН [15 – 17], у яких у якості основного блоку використано просторово-часовий суматор, що працює на основі різницевого зрізу. Пристрої працюють у режимах формального нейрона (тобто порівняння зваженої суми вхідних сигналів з порогом), цифрового інтегратора (тобто підсумовування вхідних сигналів), скалярного добутку вхідних векторів.



Рис. 8. Недоліки наявних ПМН та шляхи їхнього усунення

Для усунення недоліків найпростіших аналогових ПМН потрібно зменшувати апаратну складність моделі й організувати оптичні входи та виходи з великою вихідною оптичною потужністю. Для цього в роботі [19] запропоновано ПМН на тиристорі, який може керувати матрицею напівпровідникових лазерів, а також структуру нейронної мережі на основі таких ПМН.

Висновки

У статті доведено актуальність дослідження пристроїв для моделювання нейрона з огляду їхнього застосування в нейромережевих системах розв'язання когнітивних задач (розпізнавання образів, паралельна обробка, прийняття рішень за умов невизначеності та ін.), коли застосування традиційних комп'ютерів стає неефективним. Виконано ґрунтовний

патентний пошук, у результаті якого було знайдено 91 авторське свідоцтво СРСР, 9 патентів та 5 заявок Росії, 9 патентів України щодо пристроїв для моделювання нейронів. Створено класифікацію відомих пристроїв для моделювання нейронів за різними критеріями, розглянуто типові види нейронних елементів з різною формою представлення інформації, проаналізовано різні види елементної бази. Проаналізовано недоліки відомих пристроїв для моделювання нейронів і запропоновано напрямки їхнього вдосконалення: для багаторозрядних цифрових ПМН – це підвищення швидкодії та розширення функціональних можливостей за рахунок використання в якості основного блоку просторово-часового суматора, який працює на базі різницевого зрізів, а для найпростіших аналогових ПМН – зменшення апаратної складності та організація оптичних входів та виходів з великою вихідною оптичною потужністю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Галушкин А. И. Нейрокомпьютеры. Кн. 3 : Учебное пособие для вузов / [Общая редакция А. И. Галушкина]. – М.: ИПРЖР, 2000. – 528 с. – ISBN 5-93108-007-4.
2. Вінцюк Т. К. Образний комп'ютер: концепції, методологія, підходи / Т. К. Вінцюк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2001. – № 1. – С. 125 – 138.
3. Кожем'яко В. П. Класифікаційна модель створення прототипу образного комп'ютера / В. П. Кожем'яко, Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2006. – № 2 (12). – С. 129 – 138.
4. Бардаченко В. Ф. Таймерні нейронні елементи та структури Монографія // В. Ф. Бардаченко, О. К. Колесницький, С. А. Василецький. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005, – 126 с.
5. А. с. 964662 СССР, МКИ³ G 06 F 7/650. Модель формального нейрона / Фурсин Г. И. (СССР). – №3002819/18-24 ; заявл. 05.11.80 ; опубл. 07.10.82, Бюл. № 37.
6. А. с. 1479944 СССР, МКИ³ G 06 F 7/650. Устройство для моделирования нейрона / Каляев А. В., Чернухин Ю. В., Брюхомицкий Ю. А., Галуев Г. А. (СССР). – №4296969/31-13 ; заявл. 24.08.87 ; опубл. 15.05.89, Бюл. № 18.
7. А. с. 860096 СССР, МКИ³ G 06 F 7/650. Устройство для воспроизведения передаточной функции нервной клетки / Кирин А. А. (СССР). – №2723778/18-24 ; заявл. 26.01.79 ; опубл. 30.08.81, Бюл. № 32.
8. А.с. 1138813 СССР, МКИ³ G 06 F 7/650. Устройство для моделирования функций нейрона / Кузнецова В. Л., Раков М. А., Овсяк В. К. – № 3572016/28-13; заявл. 30.03.83; опубл. 07.02.85. Бюл. № 5.
9. А. с. 623215 СССР, МКИ³ G 06 F 7/650. Устройство для моделирования нейрона / Кряхтунова М. М., Соколов Б. А., Титов Ю. Ф. (СССР). – №2466323/18-24 ; заявл. 24.03.77 ; опубл. 05.09.78, Бюл. № 33.
10. А. с. 482766 СССР, МКИ³ G 06 F 7/650. Модель нейрона / Иващенко В. Г., Цыбышев Е. Д. (СССР). – №2024002/18-24 ; заявл. 12.05.74 ; опубл. 30.08.75, Бюл. № 32.
11. А.с. 376787 СССР, МКИ³ G 06 F 7/650. Устройство для моделирования нейрона / Снежко Е. М. (СССР). – №1661157/18-24 ; заявл. 31.05.71 ; опубл. 05.04.73. Бюл. № 17.
12. Пат. 22956А Україна, МПК G 06 F 7/50. Модель нейрона / Колесницький О. К., Кожем'яко В. П., Нізельський М. Б., Василецький С. А., заявник і власник патенту Вінницьк. нац. технічн. ун-т – №97041757/18-24 ; заявл. 15.04.97 ; опубл. 05.05.98.
13. NASA TECH BRIEFS [Електронний ресурс] : Biomorphie analog pulse - coupled neural circuits – Режим доступу : <http://www.techbriefs.com/component/content/article/7354>.
14. Кожем'яко В. П. Моделі нейронних елементів логіко-часового типу / В. П. Кожем'яко, Т. Б. Мартинюк, І. В. Мороз, А. А. Яровий // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2007. – № 14. – С. 63 – 71.
15. Пат. 27751 Україна, МПК G 06 F 7/50. Пристрій для моделювання нейрона / Кожем'яко В. П., Мартинюк Т. Б., Кожем'яко А. В., Мороз І. В.; заявник і власник патенту Вінницьк. нац. технічн. ун-т – № u200708023; заявл. 16.07.07; опубл. 12.11.07, Бюл. № 18.
16. Пат. 34466 Україна, МПК G 06 F 7/50. Пристрій для моделювання нейрона / Кожем'яко В. П., Мартинюк Т. Б., Колесницький О. К., Мороз І. В., Чечельницький О. І., заявник і власник патенту Вінницьк. нац. технічн. ун-т – № u200803614; заявл. 21.03.08; опубл. 11.08.08, Бюл. № 15.
17. Пат. 38491 Україна, МПК G 06 F 7/50. Пристрій для моделювання нейрона / Мартинюк Т. Б., Куперштейн Л. М., Мороз І. В., Чечельницький О. І., заявник і власник патенту Вінницьк. нац. технічн. ун-т – № 200810096; заявл. 04.08.08; опубл. 12.01.09, Бюл. № 15.
18. Kolesnytskyj O. K. Optoelectronic Implementation of Pulsed Neurons and Neural Networks Using Bispin-Devices / O. K. Kolesnytskyj, I. V. Bokotsey, S. S. Yaremchuk // Optical Memory & Neural Networks (Information

Optics). – 2010, – Vol.19, № 2, P. 154 – 165.

19. Колесницький О. К. Компактна оптоелектронна реалізація імпульсної нейронної мережі / О. К. Колесницький, І. В. Бокоцей // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2010. – № 2. – С. 54 – 62.

Колесницький Олег Костянтинович – к. т. н., доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук, okk_vin@mail.ru.

Бокоцей Ірина Віталіївна – аспірант, інженер 1-ої категорії кафедри комп'ютерних наук, leo_19851985@mail.ru

Корінний Анатолій Андрійович – старший викладач кафедри адміністративного та інформаційного менеджменту.

Вінницький національний технічний університет.